

Mise en valeur numérique et reconstruction 3D du théâtre gallo-romain de Mandeure

■ Pierre ASSALI

Depuis 2007, le groupe PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique) de l'INSA de Strasbourg intervient sur le site du théâtre antique de Mandeure dans le cadre d'un Projet Collectif de Recherches. L'ensemble des données acquises depuis 3 ans vise à la sauvegarde numérique du site via la construction de modèles tridimensionnels servant de support à l'expertise archéologique. La réalisation de ces modèles nécessite la combinaison de données lasergrammétiques et photogrammétriques. L'utilisation de la technique de Corrélation Epipolaire Dense (CED) nous permet ainsi de générer des nuages de points 3D à partir d'images 2D et ainsi de compléter le nuage lasergrammétrique. En veillant à la cohérence géométrique de l'ensemble, nous construisons ensuite le modèle surfacique maillé représentant le théâtre dans son état actuel. Avec l'appui d'expertises architecturales et archéologiques conjointes, nous pouvons alors proposer une restitution tridimensionnelle du théâtre dans son état antique. Des images de synthèse sont alors créées à des fins de communication, notamment pour le grand public.

■ MOTS-CLÉS

Lasergrammétrie, photogrammétrie, modélisation et maquette 3D, restitution, théâtre antique

Au travers de son projet d'agglomération 2020, la Communauté d'Agglomération du Pays de Montbéliard (CAPM) a reconnu d'intérêt communautaire la valorisation touristique du site antique de Mandeure-Mathay qui attire chaque année plusieurs milliers de visiteurs. Ce sont les vestiges encore visibles du théâtre antique qui représentent l'atout majeur du site. En effet, avec ses 142 mètres de diamètre pour une trentaine de hauteur, le théâtre impose naturellement sa monumentalité. Ce site méconnu du grand public constitue pourtant le deuxième plus vaste théâtre des Gaules (derrière celui d'Autun). Dans un contexte de mise en valeur globale du site, un projet de numérisation a été mis en place permettant, de plus, la proposition d'une restitution du théâtre antique via la création d'une maquette virtuelle 3D.

Depuis 2007, le groupe PAGE (Photogrammétrie Architecturale et GEomatique) intervient sur le site dans le cadre d'un Projet Collectif de Recherches. L'ensemble des données acquises depuis 3 ans vise à la sauvegarde numérique du site via la construction de modèles tridimensionnels servant de support à l'expertise archéologique. Les principaux objectifs du projet sont :

- Inventaire et organisation des données existantes numérisées par le laboratoire depuis 2007.
- Acquisition complémentaire et numérisation finale du théâtre (complétion du modèle existant) : LiDAR aérien, LiDAR terrestre, photogrammétrie (Corrélation Epipolaire Dense - CED).
- Constitution d'une base de données documentaire photographique (texture ou simple documentation archéologique).

- Création d'une maquette 3D virtuelle du théâtre "tel que construit", sur la base du modèle "tel que mesuré", et surtout selon l'expertise architecturale des archéologues de l'Université de Strasbourg, spécialistes du site.
- Mise en place des chaînes de traitements permettant d'aboutir à un produit final exploitable par les archéologues (fichiers *.pdf 3D par exemple).

Acquisition numérique et exploitations

Les données acquises sur le site au cours de différentes campagnes sont principalement de deux types : des nuages de points obtenus par balayage laser (terrestre et aérien), et des clichés photographiques. La phase de traitement consistera notamment en la production de nuages de points à partir de ces photographies (CED) et en leur intégration au modèle lasergrammétrique.

Les données LiDAR sur lesquelles nous avons travaillé ne sont qu'un échantillon extrait de la campagne de levé effectuée par la société AERODATA France en avril 2009. Elles représentent un carré de 500 m de côté, soit une surface de 25 hectares, incluant le théâtre antique. Ces données ne sont pas brutes et résultent d'un premier traitement visant à obtenir le Modèle Numérique du Terrain. Nous disposons d'un million de points, à raison d'un point tous les 50 cm. La résolution spatiale de ce jeu de données ne nous permet pas de l'utiliser pour la numérisation des structures d'intérêt (murs, sondages...) mais plutôt pour les zones du terrain qui ne sont traitées ni par le laser terrestre ni par les levés photogrammétriques. Cela représente un

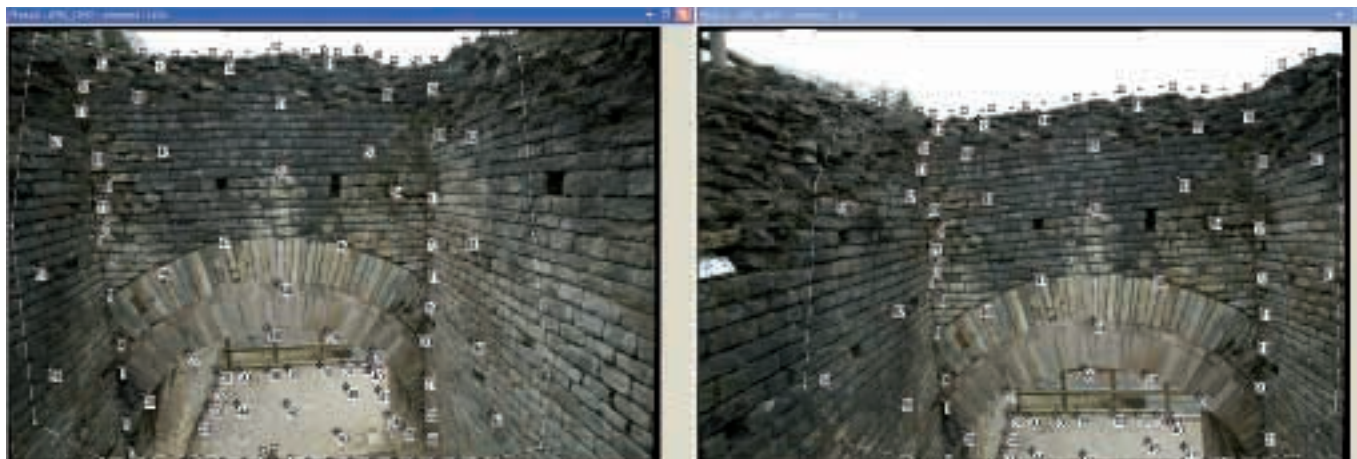


Figure 1. Exemple de couple stéréoscopique orienté et nuage de points correspondant.

complément tout à fait essentiel pour la construction de notre modèle.

Le laser-scanner terrestre (TLS) utilisé est le *Trimble GX*. Cet appareil est basé sur le principe du laser à impulsions, où la distance à un objet ou à une surface est donnée par la mesure du délai entre l'impulsion et la détection du signal réfléchi, c'est-à-dire le temps de parcours de l'onde (Scanner à "temps de vol", se distinguant des scanners à "différence de phase"). Le *Trimble GX* est équipé d'un système optique fonctionnant en association avec le laser et associant à chaque point mesuré une composante colorimétrique (RVB) permettant des rendus plus réalistes.

Pour la prise des photographies, nous avons utilisé un *Canon EOS-5D* avec deux objectifs : 20 mm et 28 mm. Les traitements photogrammétriques consistent en la production de nuages de points 3D via l'algorithme de Corrélation Epipolaire Dense du logiciel *PhotoModeler Scanner (PMS)*. Cette technique est utilisée afin de compléter le modèle dans les zones inaccessibles au laser-scanner. Le principe d'acquisition de nuages de points denses par photogrammétrie terrestre est décrit dans [Hullo et al, 2009]. Lors de l'acquisition des couples stéréoscopiques, on veillera à assurer un rapport b/h (base/hauteur) compris entre 0.1 et 0.5. Un exemple de stéréopaire acquise dans l'un des couloirs de circulation interne du théâtre est illustré en *figure 1*. Les dimensions d'un pixel sur l'objet, valeur dépendant de la focale de l'objectif et de l'éloignement à l'objet, nous permettaient d'atteindre une résolution spatiale de l'ordre du millimètre. Néanmoins, nous avons opté pour une résolution spatiale centimétrique (1 cm), compromis entre la densité du nuage de points généré et la durée des calculs nécessaires.

Le tableau présenté en *figure 2* récapitule la phase de numérisation du site en quelques chiffres clés.

L'étape de consolidation des nuages de points photogrammétriques peut se réaliser de deux manières : soit en amont de la génération des nuages par Orientation Absolue des modèles photogrammétriques, soit en aval par recalage sur le nuage laser (transformation à 7 paramètres) dans le logi-



	LIDAR aérien	TLS	CED
Nb sations		14	500 photos - 125 projets PMS
Nb points	1 million	8 millions	16 millions*
Résolution spatiale	50 cm	1 cm à 5 cm	1 cm
Type d'informations	XYZ	XYZ + RVB	XYZ + RVB

*14 millions pour le théâtre + 2 millions pour les vestiges sous le pavillon.

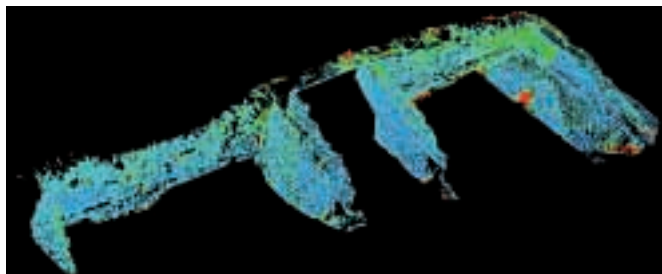
Figure 2. La numérisation du site de Mandeure - Les chiffres clés.

ciel *3DReshaper*. En considérant le nuage lasergrammétrique comme étant la référence, un contrôle local est ensuite effectué par une mesure de distance nuage-nuage grâce au logiciel *CloudCompare*, afin de garantir la cohérence géométrique du modèle.

Une fois l'ensemble des nuages générés et géoréférencés (voir *figure 4*), nous pouvons aborder la création du modèle surfacique maillé du théâtre.



(a) Photographie de la zone test du contrôle



(b) Nuage de points coloré en fonction des écarts mesurés

Figure 3. Calcul des distances Nuage-Nuage dans *CloudCompare*.

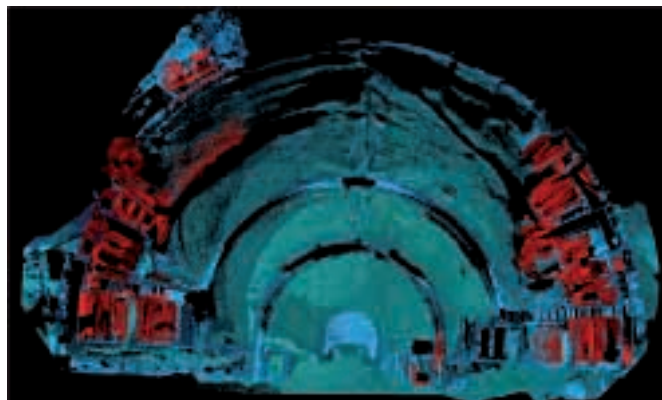


Figure 4. Le nuage de points général - Laser en bleu-vert / CED en rouge. Les zones où des données semblent manquer sont complétées par les données du LiDAR aérien.

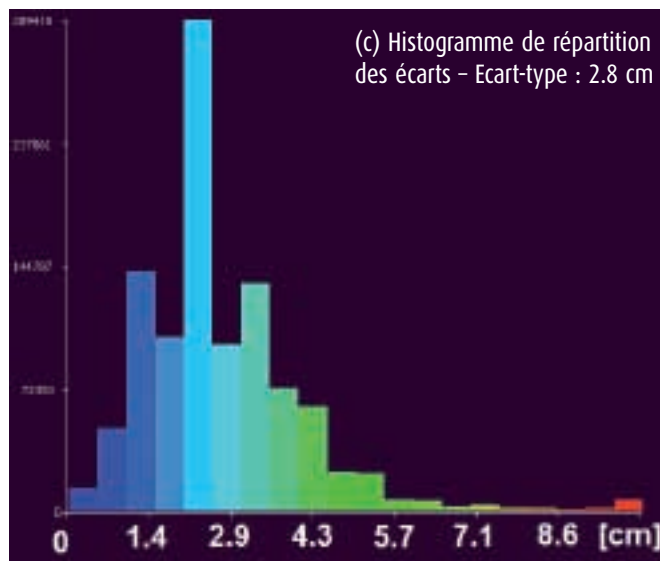
Le modèle contemporain

La construction du modèle contemporain du théâtre est un élément capital pour la valorisation du site. Ce modèle en permettra également une meilleure compréhension tout en servant de base pour la restitution du théâtre antique.

Le logiciel *3DReshaper* est utilisé pour la construction du modèle surfacique maillé du théâtre dans son état actuel. Il

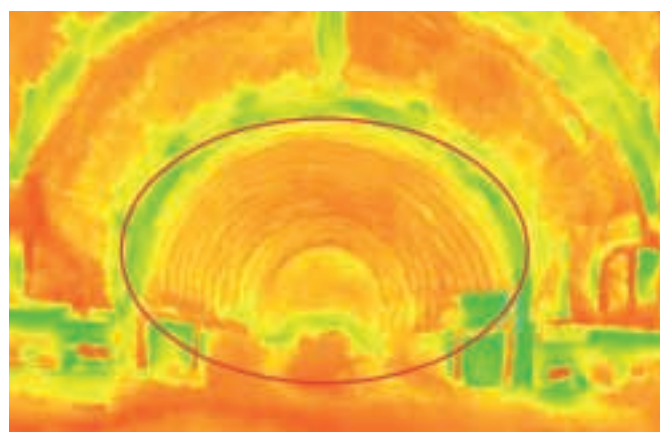


Figure 5. Le modèle maillé contemporain du théâtre (rendus PCV). A gauche : niveaux de gris. A droite : Zoom au centre du théâtre, pseudo-couleurs.



permet la création de surfaces tridimensionnelles à partir de simples nuages de points. En réalisant un rééchantillonnage régulier, le logiciel sélectionne les points à conserver puis effectue le maillage grâce à une triangulation de Delaunay 3D. Une opération de lissage du modèle est ensuite effectuée. Elle permet d'éliminer des erreurs produites par la procédure de triangulation. Avant d'appliquer la texture sur le modèle, une première phase d'exploitation géométrique peut être réalisée. Nous utilisons pour cela le logiciel *CloudCompare* qui permet de réaliser des rendus visuels de type PCV (Portion de Ciel Visible). Ce genre de rendu augmente la perception naturelle des replis et du relief de l'objet [Duguet et Girardeau-Monaut, 2004]. Nous pouvons par exemple mettre en évidence les traces des rangs de proédrie comme illustré en figure 5. Les traces de ces premières rangées de gradins autour de l'orchestra sont difficilement détectables sur le terrain. Ce type de visualisation fournit donc aux archéologues une information inédite concernant les formes, dimensions et emplacements de ces éléments.

Le placage des textures est un problème inhérent à la réalisation de modèles tridimensionnels. Ici nous le réalisons avec *3DReshaper*. L'orientation des photos nécessaires au placage de la texture peut être réalisée manuellement par



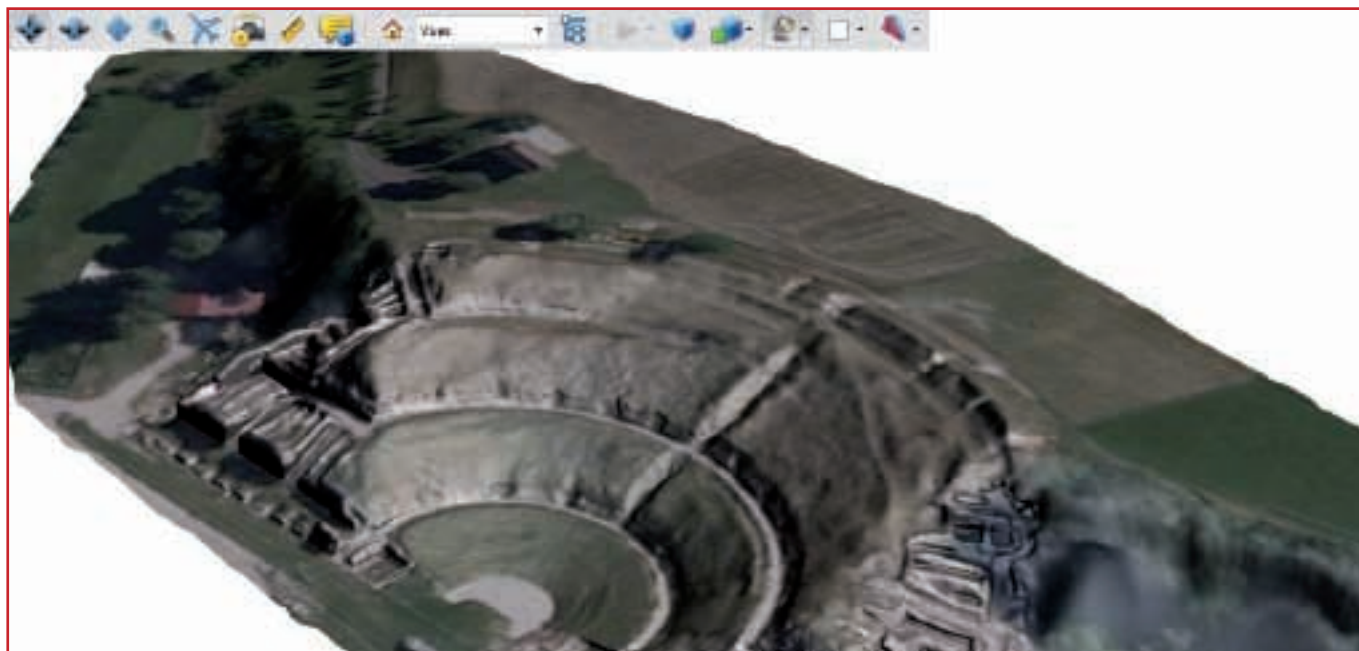


Figure 6. Extrait du fichier pdf3d du modèle contemporain texturé du théâtre (avec barre d'outils).

► sélection de points homologues au maillage et aux photos. Il est également possible (et préférable) de récupérer les informations de position/orientation des clichés depuis *PhotoModeler* et de les importer dans *3DReshaper*. Afin d'automatiser une part de ce transfert, une fonction MatLab a été écrite, fluidifiant ainsi les opérations. Nous déplorons cependant des difficultés pour les texturages multi-images nécessitant un prédécoupage du modèle. En effet, à l'heure actuelle, la fusion des parties prédécoupées implique une perte de la texture. C'est pourquoi notre modèle n'a été texturé qu'avec une seule image, puis exporté au format *.obj afin de créer le fichier *pdf 3D. Ce type de format est idéal pour la diffusion des modèles puisque gratuit (en lecture) et accessible à tous. Il permet, grâce à un simple *reader pdf*, la manipulation de modèles tridimensionnels. Des outils de coupe et de mesures de distances 3D sont également disponibles.

Le modèle antique restitué

La maquette virtuelle tridimensionnelle du théâtre antique est un modèle géométrique de restitution. Elle se base conjointement sur les mesures du terrain et sur les hypothèses architecturales. Le modèle global résulte en réalité de l'assemblage d'une multitude de pièces modélisées de manière indépendante. Le processus de modélisation nécessite l'utilisation de trois logiciels :

Google SketchUp Pro 7

AutoCAD (Autodesk)

3D Studio Max (Autodesk)

La modélisation, surtout lorsqu'elle requiert l'utilisation de différents logiciels, nécessite une méthodologie rigoureuse qu'il conviendra de respecter une fois établie. Sur la base des plans 2D fournis par M. Nouredine YEZLI, architecte, nous réalisons tout d'abord les gabarits des pièces.

Grâce à des fonctions de modélisation par extrusion (balayage d'une génératrice le long d'une directrice), les modèles 3D des pièces sont ensuite réalisés, avant d'être assemblés suivant le principe des Références Externes. Une fois le "puzzle" reconstruit, c'est-à-dire lorsque l'étape de modélisation géométrique est terminée, la maquette est importée dans 3D Studio Max. Ce logiciel nous permet ensuite d'appliquer des matériaux aux différentes parties de la maquette puis de placer les éclairages nécessaires aux différents rendus d'ombres et de lumière.

En tant qu'outil de communication, cette maquette doit permettre de fournir des images utilisables tant par les experts que par le grand public. Dans cette optique, nous avons réalisé des rendus images (et vidéos), comme illustré en figure 7.

Conclusion

Ce projet de numérisation du théâtre gallo-romain de Mandeure a permis la mise en œuvre de procédés divers visant la création de modèles tridimensionnels. L'intérêt majeur de l'étude a résidé principalement dans la combinaison de différents types de données. Ainsi l'utilisation de la technique de Corrélation Epipolaire Dense à grande échelle a permis la complétion du nuage de points général du théâtre. Menés depuis 2007, les travaux collaboratifs sur le site de Mandeure ont permis de mener à bien ce projet depuis l'acquisition des données sur le terrain jusqu'à la présentation d'une restitution architecturale de l'édifice antique. De plus, les travaux réalisés sur la maquette 3D du théâtre doivent à terme servir de support à la mise en valeur du site, et seront exposés dans le pavillon muséographique en cours de construction. Tous ces éléments ont naturellement contribué à rendre ce projet vivant et passionnant. ●

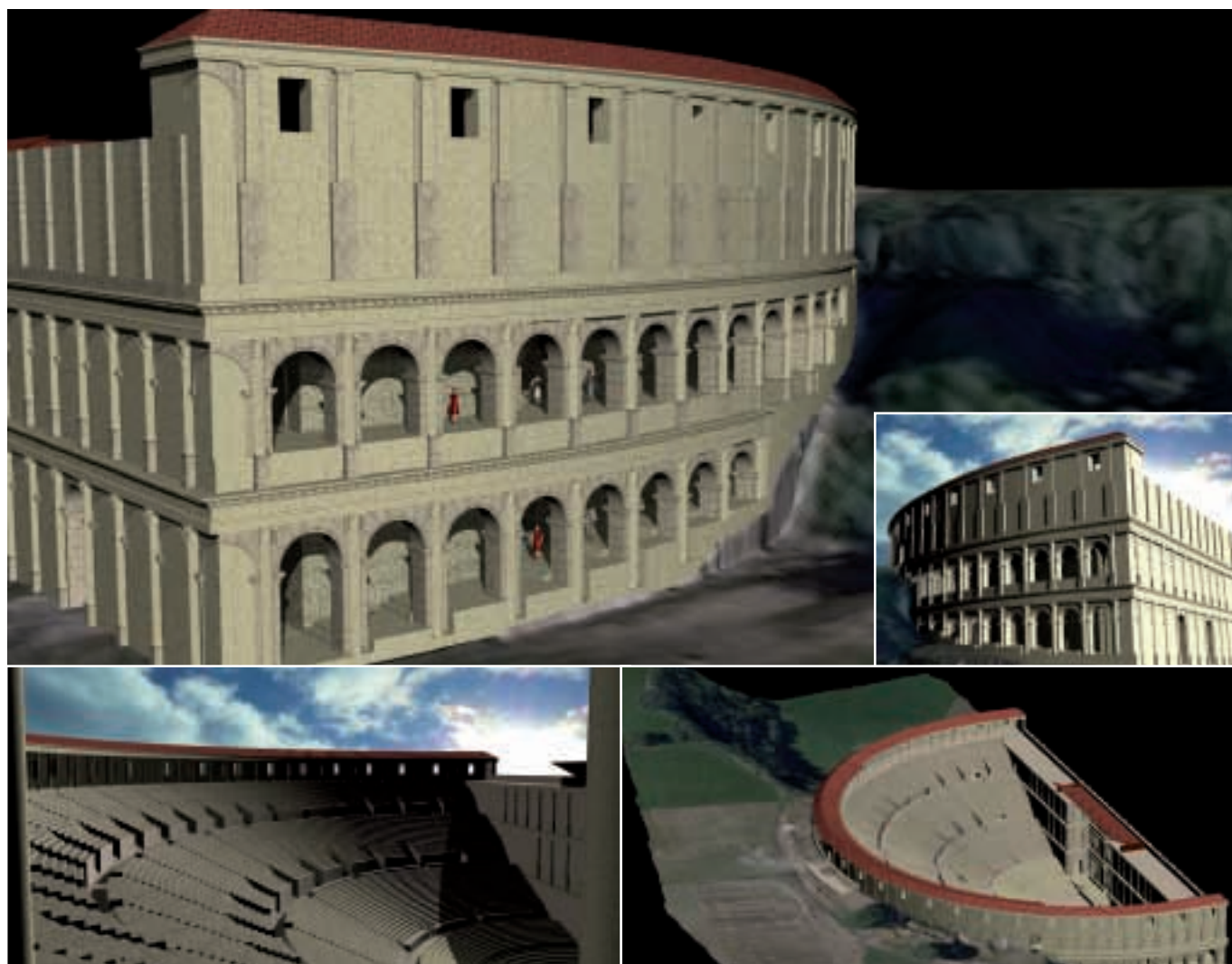


Figure 7. Différentes vues de la maquette finale.

Bibliographie

- [De Luca, 2006] De Luca, L. (2006). *Relevé et multi-représentations du patrimoine architectural* - Définition d'une approche hybride de reconstruction 3D d'édifices. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre d'Aix-en-Provence.
- [Fuchs, 2006] Fuchs, A. (2006). *Outils numériques pour le relevé architectural et la restitution archéologique*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1.
- [Hullo et al, 2009] Hullo, J.-F., Grussenmeyer, P., Fares, S. (2009). *Photogrammetry and dense stereo matching approach applied to the documentation of the cultural heritage site of kilwa (Saudi Arabia)*, in 22nd CIPA Symposium, October 11-15, 2009, Kyoto, Japan
- [Olivier, 1989a] Olivier, A. (1989a). *Autun : Esquisse d'une restitution architecturale*. Dossiers Histoire et Archéologie, n°134 : pages 36-41.
- [Olivier, 1989b] Olivier, A. (1989b). *Les théâtres de la Gaule romaine - Vocabulaire d'architecture*. Dossiers Histoire et Archéologie, n°134 : pages 16-17.

Contact

Pierre ASSALI
pierre.assali@gmail.com

ABSTRACT

Key words: Lasergrammetry, photogrammetry, 3D modeling, architectural restitution, antic theater

Since 2007, the group PAGE (Architectural Photogrammetry and Geomatics - INSA Strasbourg) operates on the site of the antic theater of Mandeure as part of a Collective Research Project. All data acquired for three years aimed at digital preservation of the site via the construction of three-dimensional models for supporting archaeological expertise. The realization of these models requires a combination of photogrammetric and lasergrammetric data. Using the technique of Dense Stereo Matching (DStM) allows us to generate 3D point clouds from 2D images and thus complement the lasergrammetric cloud. By ensuring geometrical consistency, we construct the mesh surface model representing the theater in its current state. With the joint support of architectural and archaeological expert, we propose a three-dimensional restitution of the antic theater. Then synthesized images are created at ends of communication, particularly for a large public.